

路基压实度快速检测方法对比及现场适用性研究

王钱胜

新疆生产建设兵团建设工程质量检测中心有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 路基压实度是控制道路工程质量的核心指标之一,直接影响路面结构的稳定性、耐久性和使用性能。传统压实度检测方法(如灌砂法、环刀法)虽精度高,但操作繁琐、耗时长、破坏性强,难以满足现代公路建设对高效、无损、实时质量控制的需求。近年来,多种快速无损检测技术被引入路基压实度检测领域,包括核子密度仪法、落球式弯沉仪法(FWD)、便携式落锤弯沉仪(PFWD)、地质雷达(GPR)以及智能压路机集成系统等。本文系统梳理了上述主流快速检测方法的基本原理、技术特点与适用条件,通过理论分析、现场试验与数据对比,综合评估其在不同土质、含水率、施工阶段下的检测精度、效率及经济性,并提出基于工程场景的选型建议。研究表明:核子密度仪适用于细粒土且需严格校准;PFWD在粗粒土中表现优异,具有良好的重复性;智能压路机可实现全过程连续监测,但需配合点测验证;多方法融合是未来压实质量智能管控的发展方向。本研究可为公路、铁路等基础设施建设中的压实质量控制提供技术参考。

关键词: 路基压实度;快速检测;无损检测;核子密度仪;PFWD;智能压路机;现场适用性

引言

我国交通基础设施建设规模扩大,“智慧工地”理念推广,对路基施工质量控制提出更高要求。路基压实度关乎道路整体性能,压实不足或过度均会带来不良影响,准确高效检测压实度是保障工程质量的关键。传统压实度检测方法(灌砂法、环刀法)依据相关规程,以直接测量干密度计算压实度,准确性高,但存在明显缺陷:测试具破坏性,会破坏成型路基;单点测试耗时超30分钟,效率低;结果滞后,无法实时反馈;雨天、夜间等路段难以实施,适用范围受限。为克服问题,国内外探索快速、无损或微损检测技术,虽有多种技术发展,但各类方法差异大,缺乏系统性对比与评价体系,工程实践选型盲目、结果误判。本文将梳理主流快速检测方法,通过分析、验证与对比,明确其技术边界与适用场景,为选型提供依据,推动压实质量智能管控体系构建。

1 主流快速检测方法原理与技术特点

1.1 核子密度仪法

核子密度仪利用放射性同位素(通常为铯-137和镅-241/铍)发射 γ 射线和中子束。 γ 射线在穿透土体后被散射,其强度与材料密度呈负相关关系,探测器接收散射信号后可推算出湿密度;同时,中子束与土中氢原子(主要存在于水分子中)发生慢化作用,通过测量慢化中子数量可间接获得含水率。仪器内置算法结合湿密度与含水率,即可输出干密度及压实度值。该方法操作简便,单点测试仅需2至3分钟,且能同步获取密度与含水率信息,在细粒土(如黏土、粉土)中表现出较高的检测精度。然

而,核子密度仪也存在显著局限:其一,涉及放射性源,存在安全风险,操作人员必须持证上岗,并严格执行辐射防护管理;其二,对粗粒土(如级配碎石、填石)因颗粒间空隙较大、散射路径复杂,导致密度读数系统性偏低,误差增大;其三,不同土质需进行本地化标定,建立仪器读数与灌砂法结果之间的回归关系,否则难以保证准确性;此外,路基表面平整度、湿度梯度及温度变化均会对测量结果产生干扰,需在测试前进行充分准备。

1.2 便携式落锤弯沉仪

便携式落锤弯沉仪通过可控落锤对路基表面施加瞬时冲击荷载,利用高精度位移传感器记录土体在荷载作用下的瞬时回弹变形(即弯沉值),再结合弹性半空间理论(如Boussinesq解)反演出土体的动态回弹模量 $E < sub > v < / sub >$ 。在此基础上,通过项目所在地积累的经验公式(如 $E < sub > v < / sub >$ 与压实度K之间的统计关系)间接推算压实度。PFWD的优势在于其安全性高,不涉及放射性物质,设备轻便,单点测试时间约4至6分钟,适用于施工现场快速抽检。尤其在粗粒土、填石路基等传统核子仪难以准确测量的场合,PFWD凭借其整体承载性能的良好响应,展现出良好的适应性和重复性。然而,该方法本质上属于间接推算法,其精度高度依赖于本地标定曲线的可靠性^[1]。当土体含水率发生显著变化时,回弹模量会随之波动,进而影响压实度推算结果。此外,若路基表层存在松散浮土,将削弱冲击能量的有效传递,导致弯沉值偏大、模量偏低,因此测试前需对表面进行适当处理。

1.3 落球式弯沉仪

此处所指的落球式弯沉仪主要为轻型冲击设备，其工作原理与PFWD类似，但冲击能量更小，适用于浅层（通常0至30厘米）压实状态的快速评估。设备通过自由落体钢球撞击地面，记录贯入深度或回弹位移，以此判断密实程度。该方法成本低廉、操作极为简便，常用于施工初期的压实效果筛查。但由于其冲击能量有限，测试深度浅，且缺乏统一的理论模型支持，定量精度较低，难以满足工程验收要求，故一般不作为正式压实度评定的依据，更多用于辅助判断或初步排查。

1.4 地质雷达

地质雷达通过向地下发射高频电磁脉冲，并接收由不同介质界面反射回来的信号，根据信号的双程走时和振幅特征，分析地下介质的介电常数分布。理论上，土体密度越高，其介电常数越大，反射信号越强。因此，GPR具备通过介电常数变化间接反映压实度差异的潜力。该技术的最大优势在于完全无损、可连续扫描，且探测深度可达数米，还能同步识别路基内部空洞、分层等缺陷^[2]。然而，实际应用中，介电常数不仅受密度影响，更强烈地依赖于含水率、矿物成分及孔隙结构，导致压实度与雷达信号之间缺乏稳定的定量关系。目前，GPR在压实度检测中多用于定性分析或与其他方法联合使用，尚难以独立提供高精度的压实度数值。此外，设备价格昂贵，数据解释复杂，需依赖专业软件和经验丰富的技术人员，限制了其在常规工程中的普及。

1.5 智能压路机集成系统

智能压路机集成系统代表了压实质量控制的前沿方向。现代振动压路机配备高精度加速度计、位移传感器、GPS定位模块及机载计算机，可在碾压过程中实时采集振动响应信号，并计算出压实计量值(CompactionMeterValue,CMV)或机载模量(MachineDrivePower,MDP)。通过预先建立的物理模型或机器学习算法，这些参数可被转换为压实度或回弹模量，实现对整个作业面的全覆盖、全过程监测。IC系统不仅能实时显示压实状态，还可自动生成压实遍数热力图、合格区域分布图，支持“按需压实”策略，有效避免欠压或过压现象。尽管如此，IC系统仍存在一定局限：首先，初始设备投入成本较高；其次，不同压路机型号、激振参数及土质类型均需单独标定，通用性受限；再次，由于振动能量主要作用于表层，系统对深层压实状态的反映能力较弱；最后，为确保结果可靠性，仍需定期采用PFWD或核子仪等点测方法进行交叉验证。

表3: 效率与成本对比

方法	单点耗时	人员需求	设备成本(万元)	是否破坏	适用阶段
灭砂法	30~40min	2人	0.5	是	验收
核子密度仪	2~3min	1人(持证)	15~20	否	施工中/验收

2 现场试验设计与数据分析

2.1 试验概况

为对比各方法性能，选取某高速公路改扩建项目K15+200~K15+500段作为试验段，路基填料分别为：

A区：粉质黏土（细粒土，最优含水率12.5%，最大干密度1.82g/cm³）；

B区：级配碎石（粗粒土，最大干密度2.25g/cm³）。

分别采用灌砂法(标准法)、核子密度仪(Troxler3440)、PFWD(Dynatest3031)、智能压路机(BomagBW225)进行同步检测^[3]。每区布设20个测点，覆盖不同压实遍数(3~8遍)。

2.2 数据对比与相关性分析

2.2.1 细粒土(A区)结果

表1: 细粒土(A区)结果

方法	平均压实度(%)	与灌砂法相关系数R ²	单点最大偏差
灌砂法	94.2	—	—
核子密度仪	93.8	0.92	+1.8%/-2.1%
PFWD(Ev→K)	92.5	0.85	+3.0%/-3.5%
智能压路机(CMV→K)	94.0	0.88	±2.5%

分析：核子密度仪在细粒土中表现最佳，经本地标定后与灌砂法高度相关；PFWD因含水率波动(实测11.8%~13.2%)导致模量反演偏差；IC系统经3遍后趋于稳定。

2.2.2 粗粒土(B区)结果

表2: 粗粒土(B区)结果

方法	平均压实度(%)	与灌砂法相关系数R ²	单点最大偏差
灌砂法	96.5	—	—
核子密度仪	93.0	0.68	-5.2%(系统偏低)
PFWD	95.8	0.91	±2.0%
智能压路机	96.2	0.89	±2.3%

分析：核子密度仪在粗粒土中因颗粒散射导致密度低估，需谨慎使用；PFWD凭借动力响应特性，在碎石路基中展现出优异适应性；IC系统通过振动反馈有效捕捉密实度变化。

2.3 效率与成本对比

续表:

方法	单点耗时	人员需求	设备成本(万元)	是否破坏	适用阶段
PFWD	4~6min	1~2人	25~30	微损(小坑)	施工中/验收
智能压路机	实时	无需额外人员	增加8~12万/台	否	全过程

3 现场适用性综合评价

基于试验数据与工程经验,从精度、效率、安全性、

经济性、土类适应性、环境敏感性六个维度对各方法进行评分(满分5分),结果如下:

表4:适用性综合评价

方法	精度	效率	安全性	经济性	土类适应性	环境敏感性	综合得分
灌砂法	5	1	4	5	4	3	3.7
核子密度仪	4	5	2	3	3(细粒优)	4	3.5
PFWD	4	4	5	3	5(粗粒优)	3	4.0
-IC系统	3.5	5	5	2	4	2	3.8

评价结果显示,灌砂法在精度和经济性方面得分最高,但效率和非破坏性方面严重不足;核子密度仪在细粒土中精度良好、效率突出,但安全性评分低,且对粗粒土适应性差;PFWD在安全性、土类适应性(尤其粗粒土)和精度方面表现均衡,综合得分最高;智能压路机在效率和安全性上优势明显,虽初始投入较高,但全过程覆盖能力使其在现代智能工地中具有不可替代的价值。由此可得出明确的工程适用性结论:在细粒土路基施工中,核子密度仪经严格标定后可作为主要快速检测手段,辅以智能压路机进行过程控制;在粗粒土或填石路基中,PFWD应作为首选方法,其动力响应特性更能真实反映承载性能;对于追求全过程质量闭环管理的项目,推荐采用“智能压路机全程监控+PFWD定期抽检+灌砂法终验仲裁”的三级质量控制体系,以兼顾效率、精度与合规性。

4 工程应用建议与展望

4.1 应用建议

在工程实践中,快速检测方法的成功应用离不开科学的实施策略。首先,必须建立针对本项目填料的本地化标定数据库,任何未经标定的快速方法都可能引入系统性误差。其次,应摒弃“唯一方法论”,倡导多方法融合验证,形成从过程控制到最终验收的完整质量链条。再次,需加强对操作人员的专业培训,特别是在核子仪安全管理、PFWD数据解读及IC系统维护等方面,确保数据采集的规范性与可靠性^[4]。最后,应高度重视含水率对间接检测方法的影响,建议在快速检测的同时同步测定含水率,并在数据处理中予以修正,以提升结果的准确性。

4.2 技术展望

展望未来,路基压实检测技术将朝着智能化、数字化与集成化方向加速演进。人工智能技术有望实现多源传感器数据(如振动、电磁、声学信号)的深度融合,通过

深度学习模型提升压实状态反演的精度与鲁棒性。数字孪生平台将压实过程数据实时映射至BIM模型,实现质量状态的可视化、可追溯与可预测。此外,无人机搭载轻量化GPR或激光雷达系统,可实现大范围、高效率的无人化检测;而嵌入式光纤传感技术则为路基长期健康监测提供了新路径。这些前沿技术的融合,将推动路基压实质量控制从“抽样检测”迈向“全域感知、智能决策”的新范式。

5 结语

本文系统对比了核子密度仪、PFWD、智能压路机等主流路基压实快速检测方法,通过现场试验与多维评价得出以下结论:(1)传统灌砂法虽精度高,但效率低、破坏性强,难以满足现代施工需求;(2)核子密度仪适用于细粒土,但存在放射性风险且对粗粒土适应性差;(3)PFWD在粗粒土中表现突出,安全性高,是当前最具推广价值的快速检测手段;(4)智能压路机可实现全过程连续监测,是压实质量智能管控的核心载体,但需配合点测验证;(5)工程实践中应根据土类、施工阶段、成本预算等因素,采用“多方法融合、分级验证”的策略,构建高效、可靠的质量控制体系。随着传感技术、人工智能与大数据的发展,路基压实检测将逐步迈向“实时、无损、精准、智能”的新阶段,为交通基础设施高质量建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1]朱鹏.高速公路路基压实度快速检测方法研究[J].工程技术研究,2025,10(10):46-48.
- [2]轩博,雷超,张云飞.浅谈填方路基压实度快速检测方法[J].科技视界,2024,14(13):33-34.
- [3]肖崇禹.路基压实度快速检测方法现场对比试验[J].时代汽车,2026,(02):187-189.
- [4]魏育青.市政道路路基压实度的检测方法分析及控制要点[J].散装水泥,2025,(06):248-250.